

СКОРОСТИ ПРЕССОВАНИЯ: ПРОТИВОРЕЧИЯ ЗАВОДСКОЙ ПРАКТИКИ

EXTRUSION SPEEDS: CONTRADICTIONS OF FACTORY PRACTICE

Логинов Ю.Н.

Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, unl@mtf.ustu.ru

Data of calculations of average strain ratio are provided in rod production. Proceeding from the received dependences, conclusions that when extruded rod it is necessary to apply the following receptions to reduction of average strain ratio are drawn: to reduce speed of extruding, to reduce die angle, to increase diameter of an ingot and respectively, diameter of the working plug of the container.

Знание скоростного режима прессования помогает предсказать момент превышения критических скоростей, приводящих к изменению структуры металла или его разрушения, поэтому данным вопросом в разное время занимались многие авторы, например [1-3]. При описании процесса прессования различают следующие скоростные параметры: скорость истечения металла из матрицы, скорость прессования (перемещения пресс-штемпеля), среднюю (по очагу деформации) скорость деформации, распределение скорости деформации, компоненты тензора деформации. В последнее время много внимания уделяется методам описания скоростного режима в очаге деформации, например, методом конечных элементов, это позволяет за счет оптимизации формы инструмента выравнивать скорости истечения металла и не допускать его разрушения[4,5]. Скоростной режим сказывается также на формировании структуры металла. При прессовании алюминиевых сплавов введено понятие структурного упрочнения, т.е. увеличение прочностных свойств изделий за счет сохранения нерекристаллизованного состояния нагартовки, полученной в процессе прессования. Это состояние достигается при определенном сочетании температуры, степени и скорости деформации[6,7].

При прочих равных условиях для сохранения деформированной структуры необходимо стремиться к поддержанию скорости деформации ниже критического уровня, поэтому важно уметь определять скорость деформации, а также иметь представление, о том, какие параметры на нее влияют.

Скорость деформации пытались определить многие исследователи, при этом формулы для расчета этой величины оказывались разными. Мешает определить адекватность формул отсутствие надежных методик измерения скорости деформации непосредственно в ходе процесса прессования.

В справочнике немецких авторов [3, с.107] приводится формула для определения средней по объему скорости деформации ξ при прессовании прутка диаметром $D_{пр}$ из контейнера диаметром D_k через матрицу с углом наклона образующей α :

$$\xi = \frac{2v_0(\lambda - 1)\operatorname{tg}\alpha}{D_k - D_{пр}}, \quad (1)$$

где v_1 – скорость истечения, связанная со скоростью прессования соотношением $v_1 = \lambda v_0$; λ – коэффициент вытяжки.

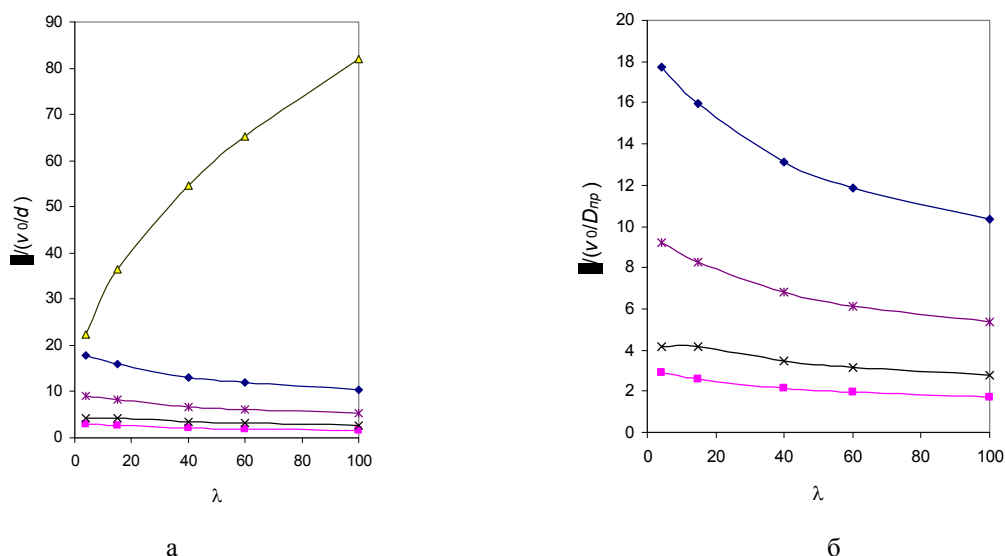


Рис.1. Зависимости безразмерной средней скорости деформации при прессовании прутков через матрицу с $\square = 60^\circ$ (а) и с $\alpha = 75^\circ$ (б) от коэффициента вытяжки при использовании различных формул: Δ - (1); x - (2); \blacksquare - (3); \blacklozenge - (4); ж – (5)

Используя соотношение $D_0/D_{np} = \sqrt{\lambda}$, получим

$$\xi = \frac{2v_1(\lambda - 1)tg\alpha}{\lambda(\sqrt{\lambda} - 1)D_{np}}. \quad (1a)$$

Удобнее оперировать безразмерными переменными, поэтому разделим правую часть на дробь v_1/D_{np} и получим безразмерную среднюю скорость деформации

$$\bar{\xi} = \frac{2(\lambda - 1)tg\alpha}{\lambda(\sqrt{\lambda} - 1)}. \quad (1б)$$

В соответствии с этой формулой при увеличении угла α скорость деформации увеличивается, при этом остаются неизвестными пределы возможного увеличения. Функция тангенса при приближении угла к 90° , что характерно для применения плоских матриц, стремится к бесконечности, что лишает задачу физического смысла. Авторы постарались избежать этого противоречия, утверждая, что в большинстве случаев можно назначать угол $\alpha = 45^\circ$.

В этом же источнике информации приводится ссылка на возможность использования формулы П.Фельтама (P.Feltham) в виде:

$$\xi = \frac{6v_0 \ln \lambda}{D_K}, \quad (2)$$

однако ее действие ограничивается применением плоских матриц. Действительно, в формуле отсутствует как параметр угол наклона образующей матрицы. В безразмерном виде формула выглядит следующим образом:

$$\bar{\xi} = \frac{6 \ln \lambda}{\sqrt{\lambda}}. \quad (2a)$$

Утверждается, что расчет по последней формуле дает значительно меньшие значения скорости деформации, чем по формуле (1), но при этом предпочтение отдается формуле (1).

В соответствии с источниками [2, с.71, 8, с.265] среднюю скорость деформации при прессовании прутков диаметром D_{np} можно определить по формуле

$$\xi = \frac{3v_1 \ln \lambda \sin^3 \alpha}{(1 - \cos \alpha)(\lambda D_K - D_{np})}. \quad (3)$$

При переходе к безразмерной величине скорости деформации получим

$$\bar{\xi} = \frac{3\lambda \ln \lambda \sin^3 \alpha}{(1 - \cos \alpha)(\lambda\sqrt{\lambda} - 1)}. \quad (3a)$$

В этой формуле сложно оценить влияние угла α : он входит в виде возрастающей тригонометрической функции в числитель и в виде убывающей тригонометрической функции со знаком минус в знаменатель. То же касается и коэффициента вытяжки – он входит в числитель в виде функции логарифма и в знаменатель в виде различных функций. Можно отметить, что функции синуса и косинуса не обращаются в бесконечность

при приближении к углу, равному 90° (случай применения плоской матрицы), поэтому их использование не приводит к техническим парадоксам.

В справочнике [9] приводится другая формула для определения ξ_{cp} :

$$\xi = \frac{6v_1 \ln \lambda tg\alpha}{(\lambda\sqrt{\lambda} - 1)D_{np}}. \quad (4)$$

После преобразования к безразмерному виду получим

$$\bar{\xi} = \frac{6\lambda \ln \lambda tg\alpha}{\lambda\sqrt{\lambda} - 1}. \quad (4a)$$

В книге [10] приведена формула для расчета средней скорости деформации, полученная интегрированием поля скоростей в объеме очага деформации

$$\xi = \frac{12v_0 \lambda \ln \lambda \sin \alpha}{(\lambda\sqrt{\lambda} - 1)D_{np}}. \quad (5)$$

В безразмерном виде формула выглядит следующим образом:

$$\bar{\xi} = \frac{12\lambda \ln \lambda \sin \alpha}{\lambda\sqrt{\lambda} - 1}. \quad (5a)$$

Последняя формула структурно похожа на предыдущую формулу, отличаются числители. Если приравнять $6tg\alpha = 12 \sin \alpha$, то можно найти угол α , при котором решения совпадут, этот угол равен 60° , действительно $\sin 60^\circ = \sqrt{3}/2$, а $tg 60^\circ = \sqrt{3}$. Таким образом, при $\alpha = 60^\circ$ расчет по формулам (4) и (5) должен обеспечить одинаковый результат.

На рис.1,а приведены графики, построенные по результатам расчетов по приведенным выше формулам при изменении коэффициента вытяжки и фиксировании угла $\alpha = 60^\circ$.

Как видно из графиков не согласуется с общими тенденциями методика, изложенная немецкими авторами, поэтому в дальнейшем анализе от нее отказались. Какого-то совпадения результатов расчетов можно ожидать только при малых коэффициентах вытяжек (менее 5), что редко встречается в практике прессования. Как и ожидалось, расчетные точки, полученные по формулам (4) и (5), совпали.

На рис.1,б приведены результаты расчета для случая применения матрицы с углом наклона образующей 75° , что часто встречается в практике прессования.

Расчет показывает, что зависимости являются убывающими, т.е. при увеличении коэффициента вытяжки при прочих равных условиях скорость деформации снижается. Однако это снижение не является чрезмерным даже при переборе λ в пределах 5...100. Если принять в целом параметр $\xi/(v_1/D_{np})$ за константу, то окажется, что сама средняя скорость деформации линейно зависит от v_1 и D_{np} , только от первого

параметра прямо пропорционально, а от второго параметра обратно пропорционально.

Влияние угла наклона образующей матрицы отражено на графике рис.2.

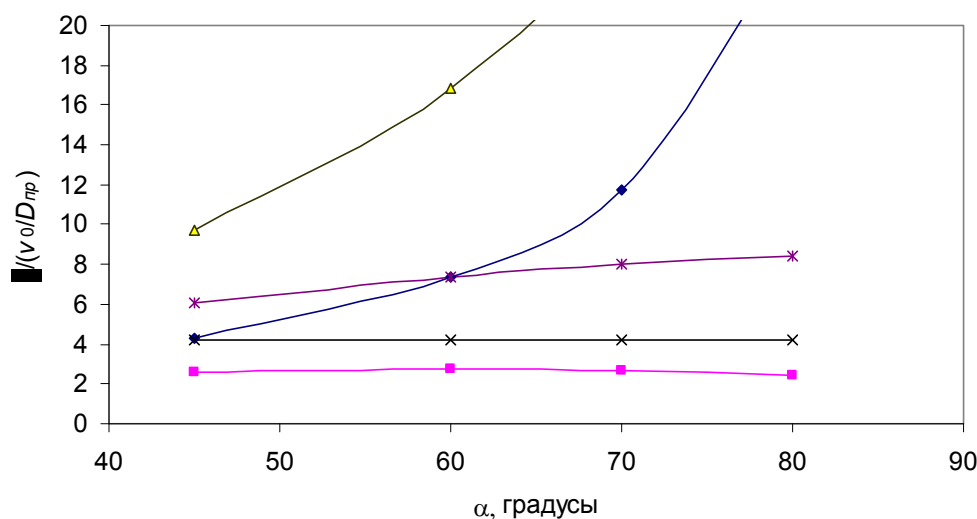


Рис.2. Зависимости безразмерной средней скорости деформации при прессовании прутков с коэффициентом вытяжки $\lambda = 15$ от угла матрицы при использовании различных формул: Δ - (1); \times - (2); \blacksquare - (3); \blacklozenge - (4); \star - (5)

Из графиков видно, что при расчете по формулам, использующим функцию тангенса угла наклона образующей матрицы, происходит значительный рост скорости деформации. Физически это можно объяснить началом образования мертвой зоны, на границе с которой возникает разрыв скоростей. Их теории пластичности известно, что на самой линии разрыва величина скорости деформации равна бесконечности, при этом степень деформации является конечной величиной. При расчете по формулам, использующим функцию синуса, этот эффект не возникает, здесь можно допустить использование плоских матриц, при этом скорость деформации останется величиной конечной. Вместе с тем остается не ясным вопрос, какими формулами следует воспользоваться для приближения расчетов к практическим результатам.

На рис.3 приведены рекомендованные скорости истечения при прессовании алюминиевых сплавов из справочного пособия, подготовленного немецкими специалистами[1, с.311].

В качестве примера анализа скорости деформации при прессовании выберем алюминиевый сплав АМг6, как материал, подверженный влиянию структурного упрочнения. Как видно из графика, наиболее близкий к сплаву АМг6 по химическому составу зарубежный аналог АlMg5 рекомендовано прессовать при скоростях истечения 3...8 м/мин. Правда в том же источнике на с.342 сообщается, что для сплава АlMg5 следует применять диапазон скоростей истечения 1...3 м/мин. Перечень управляющих параметров здесь ограничен маркой сплава, иные показатели процесса (диаметры заготовок и контейнера, углы наклона образующей матрицы, коэффициенты вытяжек) не учитываются.

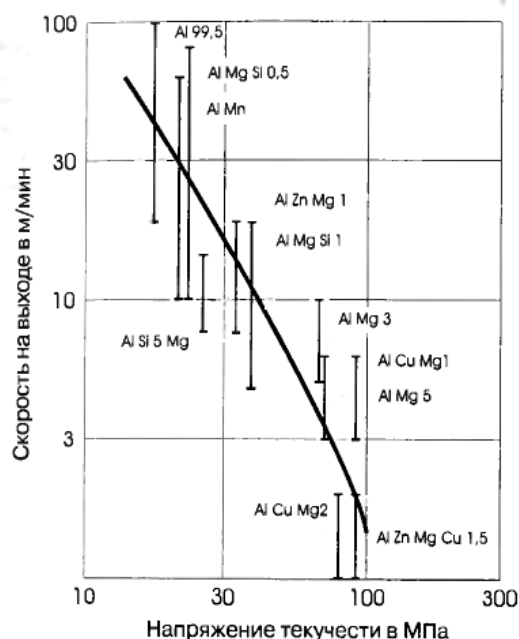


Рис. 3. Скорости истечения алюминиевых сплавов по данным немецких специалистов[3]

Анализ реальных производственных данных показывает, что скорости истечения принято считать функциями марки материала и диаметра контейнера. Так например, на ОАО «Каменск-Уральский металлургический завод» при прессовании сплава АМг6 приняты рекомендации, изложенные в книге [11] (таблица). Эти скоростные режимы соответствуют также нижней границе диапазона скоростей истечения из книги [12, с.18] (0,6...2 м/мин).

Таблица 1

Максимальные скорости истечения при прессовании прутков из сплава АМг6

Диаметр контейнера, мм	Максимальная скорость истечения	
	м/мин	мм/с
370	0,6	10,0
420	0,5	8,3
520	0,4	6,7
650	-	-

Эти скорости меньше величин, рекомендованных немецким справочником, разницу можно отнести на счет различий в поведении сплавов несколько различного химического состава. Кроме того, в список управляющих параметров в производственных условиях входит не только марка сплава, но и диаметр контейнера. В связи с этим необходимо рассчитать, как влияет изменение диаметра контейнера на изменение средней скорости деформации при прессовании.

В качестве основной расчетной формулы для последующего анализа выбрана формула (4). Она преобразована с использованием соотношения

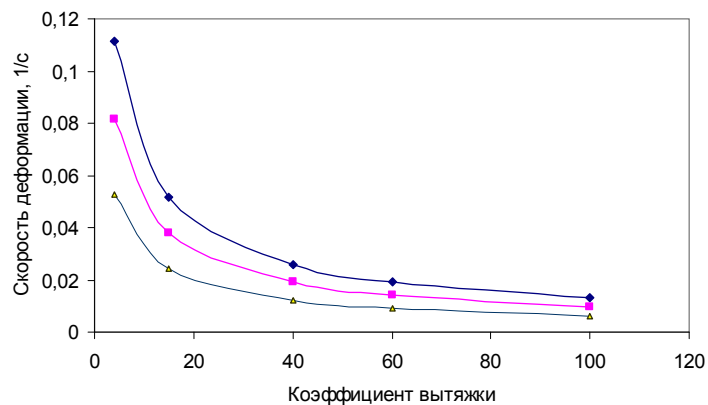
$$D_k/D_{np} = \sqrt{\lambda} \quad \text{к виду}$$

$$\xi_{cp} = \bar{\xi}_{cp} v_0 / D_{np} = \frac{6\lambda \ln \lambda t g \alpha}{\lambda \sqrt{\lambda} - 1} \frac{v_0}{D_{np}} = \frac{6\sqrt{\lambda} \ln \lambda t g \alpha}{\lambda \sqrt{\lambda} - 1} \frac{v_1}{D_k} \quad (46)$$

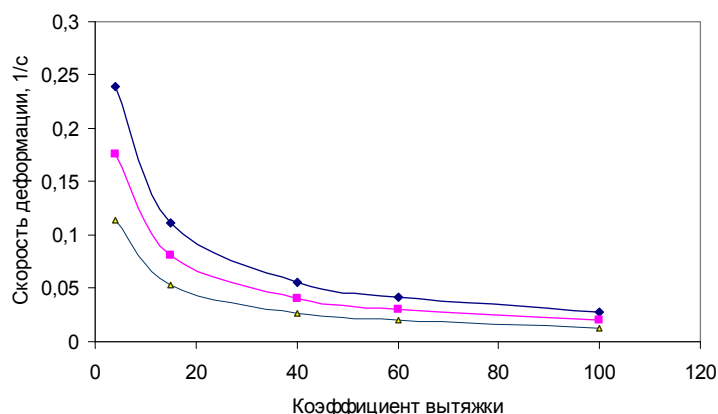
По этой формуле выполнены расчеты средней скорости деформации при назначении

параметров прессования в производственных условиях. На рис. 4 представлены результаты таких расчетов, выполненных для различных углов наклона образующей матрицы: 60° и 75°.

Как видно из графиков, полученные зависимости являются убывающими в функции коэффициента вытяжки. В диапазоне $\lambda = 5 \dots 100$ изменение скорости деформации может составить десятикратную величину. Кроме того, изменение диаметра рабочей втулки контейнера приводит к изменению скорости деформации: при увеличении диаметра с 370 до 520 мм скорость деформации снижается примерно вдвое. При увеличении угла наклона образующей матрицы с 60 до 75° происходит примерно двукратный рост скорости деформации. Следует отметить, что открытым остается вопрос, будет ли повышаться скорость деформации при переходе на все большие углы наклона образующей.



а



б

Рис.4. Зависимости средней скорости деформации при прессовании прутков при $\alpha=60^\circ$ (а) и при $\alpha=75^\circ$ (б) для различных D_k (мм): \blacklozenge - 370; \blacksquare - 420; \triangle - 520

В какой-то момент течение металла пойдет не вдоль образующей матрицы, а вдоль поверхности среза с образованием жесткой зоны. В этом случае в практике прессования применяется понятие угла естественного течения металла, а он является функцией довольно значительного количества параметров, включая коэффициенты трения на матрице и контейнере, коэффициент теплопередачи, температуру, геометрию инструмента и заготовки и т.д.

В целом, если ориентироваться на выполнение производственных рекомендаций,

диапазон изменения средней скорости прессования прутковых заготовок из сплава АМг6 составляет $0,02 \dots 0,2 \text{ с}^{-1}$, при этом большие значения относятся к меньшим коэффициентам вытяжек.

Расчет средней скорости деформации при прессовании из контейнеров различного диаметра прутков также различного диаметра (рис.5) показывает, что наибольшие значения средней скорости деформации получены для случаев прессования крупных заготовок из контейнеров умеренного диаметра.

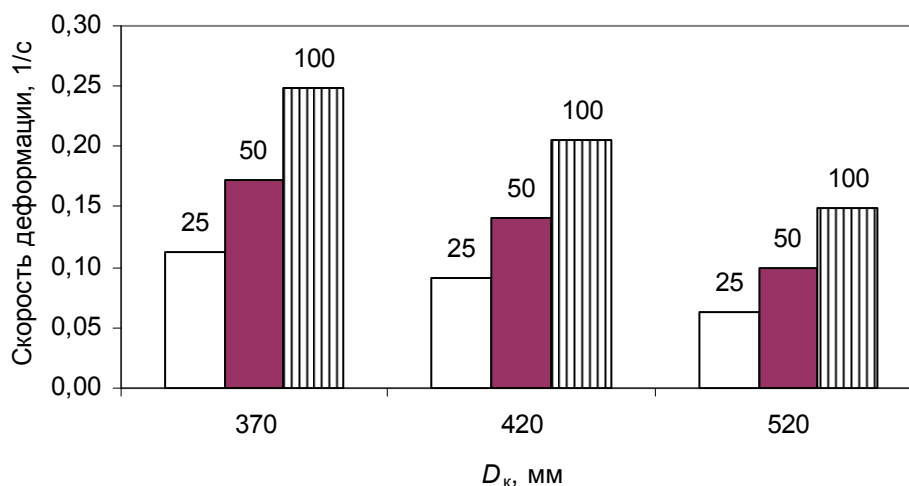


Рис.5. Средние скорости деформации при прессовании прутков при $\alpha=75^\circ$ для различных диаметров контейнеров D_k и различных диаметров прутков $D_{пр}$ (мм, числа над столбиками)

Как видно из рисунка, наибольшие значения средней скорости деформации получены для случаев прессования крупных заготовок из контейнеров умеренного диаметра. Имеющийся подход к проблеме назначения скоростных параметров приводит к тому, что скорость прессования (перемещения пресс-штемеля) оказывается больше при прессовании из контейнеров меньшего диаметра и прессовании крупных прутков, о чем свидетельствуют результаты расчета, представленные на рис.6.

Полученные расчетные данные в какой-то мере противоречат сложившемуся подходу к назначению скоростных режимов прессования. Как видно из производственных рекомендаций, при увеличении диаметра рабочей втулки контейнера необходимо снижать скорости истечения, и наоборот, скорости истечения увеличивают при переходе к втулке меньшего диаметра. Объясняется это с различных позиций. Так, в книге [11] со ссылкой на мнение ИЛ.Перлина[1] приводятся доказательства необходимости снижения скорости истечения при использовании контейнеров большого диаметра с позиции увеличения тепловой инерции более крупногабаритного слитка и

снижением вследствие этого теплоотдачи. Кроме того приводятся доводы, направленные на необходимость снижения усилия прессования именно крупногабаритных заготовок из-за нехватки номинального усилия пресса, что достигается снижением сопротивления деформации при снижении скорости истечения, а значит и скорости деформации.

При необходимости сохранения структурного неперекристаллизованного состояния в алюминиевых сплавах необходимо добиваться снижения скорости деформации. Как было показано выше, для уменьшения средней скорости деформации при прессовании прутков необходимо применять следующие приемы:

- Уменьшать скорость истечения за счет уменьшения скорости прессования.
- Уменьшать угол наклона образующей матрицы.
- Увеличивать диаметр слитка и соответственно, диаметр рабочей втулки контейнера.

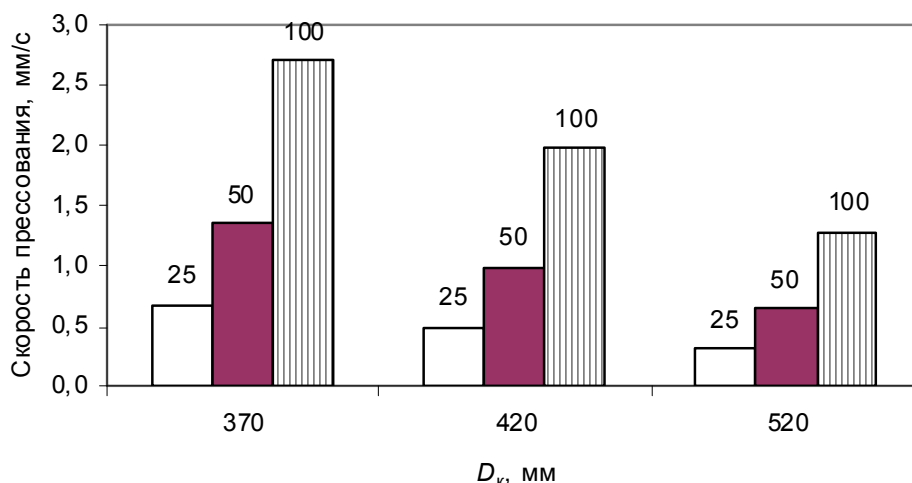


Рис.6. Скорости прессования в производстве прутков при $\alpha=75^\circ$ для различных диаметров контейнеров D_k и различных диаметров прутков $D_{пр}$ (мм, числа над столбиками)

Список литературы

1. Перлин И.Л., Райтбарг Л.Х. Теория прессования металлов. М.: Металлургия, 1975. 447с.
2. Ерманок М. З., Фейгин В. И., Сухоруков Н. А. Прессование профилей из алюминиевых сплавов. 2-е изд. М.: Металлургия, 1977. 264 с.
3. Браузер М., Зауер Г, Зигерт К. Прессование. М.: АЛЮСИЛ МВит. 2009. 918С.
4. Lu Y.H., Lo S.W. Optimally-controlled strain-rate dies for plane-strain extrusion. Journal of Materials Processing Technology. 1998. V. 86, Issues 1-3. P. 56-66.
5. Chanda Tapas, Zhou Jie, Duszczek Jurek A comparative study on iso-speed extrusion and isothermal extrusion of 6061 Al alloy using 3D FEM simulation. Journal of Materials Processing Technology, 2001. V. 114, Issue 2. P. 145-153.
6. Вайнблат Ю.М. Ланцман П.Ш., Шаршагин Н.А. Диаграммы структурных состояний горячедеформированных алюминиевых сплавов. Известия вузов. Цветная металлургия, 1974. №4. С. 155-160.
7. Логинов Ю.Н., Дегтярева О.Ф. Влияние скорости деформации на эффект структурного упрочнения прессованных труб из алюминиевого сплава 6061. Технология легких сплавов, 2007, №4. С.123-127.
8. Технология обработки давлением цветных металлов и сплавов/ А.В.Зиновьев, А.И.Колпашников, П.И.Полухин и др. М.: Металлургия, 1992. 512 с.
9. Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А.М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1976.488 с.
10. Шевакин Ю.Ф., Грабарник Л.М., Нагайцев А.А. Прессование тяжелых цветных металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1987. 246 с.
11. Ерманок М.З., Фейгин В.И. Производство профилей из алюминиевых сплавов. М.: Металлургия, 1972. 272 с.
12. Прессование алюминиевых сплавов/ Г.Я.Гун, В.И.Яковлев, Б.А.Прудковский и др. М.: Металлургия, 1974. 336с.